NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. PIERRE TERMIER,

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES,

PROFESSEUR DE MINÉRALOGIE ET DE PÉTROGRAPHIE A L'ÉCOLE DES MINES.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1903

TITRES.

Elève de l'École Polytechnique (1878-1880), sorti premier en 1880;

Élève-Ingénieur des Mines (1880-1883);

Ingénieur ordinaire des Mines (1883);

Professeur de Minéralogie, Géologie et Physique à l'École des Mines de Saint-Étienne (1885-1894);

Attaché au Service de la Carte géologique de France (1886);

Professeur de Minéralogie et Pétrographie à l'École des Mines (1894);

Adjoint à la Direction du Service de la Carte géologique (1895);

Ingénieur en chef des Mines (1898);

Président de la Société française de Minéralogie en 1897;

Vice-Président de la Société géologique de France en 1899 et en 1903;

Premier lauréat du prix Prestwich (décerné par la Société géologique de France) en 1903.

RÉCOMPENSES ACADÉMIQUES.

En 1880, prix Laplace;

En 1895, prix Saintour (*Mémoires sur le massif cristallin du Mont-Pilat, sur le massif de la Vanoise, et sur le massif des Grandes-Rousses*).

LISTE DES PUBLICATIONS.

NOTES ET MÉMOIRES

1884.

1. Études sur les éruptions du Hartz (*Ann. des Mines*, 8ᵉ série, t. V, p. 243-364).

1887.

2. Sur les éruptions de la région du Mézenc, vers les confins de la Haute-Loire et de l'Ardèche (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV, p. 1141).

1888.

3. Note sur trois roches éruptives interstratifiées dans le terrain houiller du Gard (*Bull. Soc. géol.*, 3ᵉ série, t. XVI, p. 617-623).

1889.

4. Quartz corrodé dans une microgranulite des environs d'Osaka (Japon) (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie*, t. XII, p. 10-13).
5. Nouvel exemple d'association d'andalousite et de sillimanite à axes parallèles (en collaboration avec M. Michel-Lévy) (*Ibid.*, t. XII, p. 56-59).
6. Sur un gisement de staurotide aux environs de Saint-Étienne (Loire) (*Ibid.*, t. XII, p. 393-396).
7. Sur une phyllite nouvelle, la *Leverriérite*, et sur les *Bacillarites* du terrain houiller (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVIII, p. 1071).
8. Étude sur le massif cristallin du Mont-Pilat, sur la bordure orientale du Plateau Central entre Vienne et Saint-Vallier, et sur la prolongation des plis synclinaux houillers de Saint-Étienne et de Vienne (*Bull. des services de la Carte géol.*, nº 1, t. I, p. 1-58, avec une carte).
9. Étude géologique du massif du Mont-Pilat (*Comptes rendus mensuels de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 1889, p. 177-180).
10. Étude sur la Leverriérite (*Ann. des Mines*, 8ᵉ série, t. XVII, p. 372-402).

11. I. Sur les séries d'éruptions du Mézenc et du Meygal (Velay); II. Sur l'existence de l'ægyrine dans les phonolites du Velay (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 730).
12. Les éruptions du Velay : I. Roches éruptives du Meygal. II. Argiles métamorphosées par le phonolite à Saint-Pierre-Eynac (*Bull. des services de la Carte géol.*, n° 13, t. II, p. 83-114).
13. Sur la géologie de la région de Patroa (Saint-Étienne, 1890, chez Théolier).
14. Détermination de la position des failles de Villebœuf et du Gagne-Petit dans la région de Patroa (bassin de Saint-Étienne) (*Comptes rendus mensuels de la Soc. de l'Ind. minér. de Saint-Étienne*, 1890, p. 113-120).
15. Notice explicative de la feuille de Saint-Étienne, de la carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec M. Depéret).
16. Notice sur la Leverriérite (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie*, t. XIII, p. 325-330).
17. Note sur des filons d'orthose et de quartz dans le terrain houiller de Saint-Étienne (*Ibid.*, t. XIII, p. 330-334).

1891.

18. Étude sur la constitution géologique du massif de la Vanoise (Alpes de Savoie) (*Bull. des services de la Carte géol.*, n° 20, t. II, p. 367-514; avec une carte géologique et 9 planches de coupes).
19. Sur l'existence de tufs d'andésite dans le Flysch de La Clusaz (Haute-Savoie) (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXII, p. 747).
20. Sur les terrains métamorphiques des Alpes de Savoie (*Ibid.*, t. CXII, p. 900).

1892.

21. Notice explicative de la feuille de Monistrol, de la Carte géologique détaillée de la France.
22. Sur l'existence de la microgranulite et de l'orthophyre dans les terrains primaires des Alpes françaises (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXV, p. 971).
23. Observations au sujet d'une communication de M. Rateau sur l'aérage des mines à grisou (*Comptes rendus mensuels de la Soc. de l'Ind. minér. de Saint-Étienne*, 1892, p. 61-62).

1893.

24. Sur les roches de la série porphyrique dans les Alpes françaises (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXVI, p. 900).
25. Notice explicative de la feuille du Puy, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec M. Boule).
26. Sur le Permien du massif de la Vanoise (*Bull. Soc. géol.*, 3e série, t. XXI, p. 124-133).
27. Sur un gisement d'Ammonites dans le Lias calcaire de l'Oisans (en collaboration avec M. Kilian.) (*Id.*, t. XXI, p. 273-277).

28. Compte rendu de la course du Pertuis à Saint-Julien-Chapteuil (*Id.*, t. XXI, p. 554-565).
29. Compte rendu de la course de Saint-Julien-Chapteuil à Boussoulet, par Queyrières et le Mégal (*Id.*, t. XXI, p. 565-575).
30. Compte rendu de la course de Fay-le-Froid au Mezenc (*Id.*, t. XXI, p. 578-588).
31. Compte rendu de la course du Mézenc aux Estables, par la Chartreuse-de-Bonnefoy (*Id.*, t. XXI, p. 588-595).

1894.

32. Le massif des Grandes-Rousses (Dauphiné et Savoie) (*Bull. des services de la Carte géol.*, n° 40, t. VI, p. 169-288, avec une carte géologique en couleurs et 6 planches de coupes).
33. Réponse à une Note de M. Kilian sur les calcaires dolomitiques triasiques des Grandes-Rousses (*Compte rendu sommaire des séances de la Soc. géol.*, 1894, p. XCVII-XCVIII).
34. Étude pétrographique des micaschistes et autres roches cristallines du Petit-Mont-Cenis (*Ibid.*, p. CVIII-CXI).

1895.

35. Notice explicative de la feuille de Saint-Jean-de-Maurienne, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec MM. Marcel Bertrand, Kilian, Offret et Potier).
36. Notice explicative de la feuille de Bonneval, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec M. Marcel Bertrand).
37. Feuilles de Briançon et de Bonneval (*Bull. des services de la Carte géol.*, n° 44, t. VII, p. 147-152).
38. Sur le sondage de Saint-Bonnet-de-Mure (recherches d'Heyrieux) (*Comptes rendus mensuels de la Soc. de l'Ind. minér. de Saint-Étienne*, 1895, p. 96-99).
39. Sur des lambeaux de terrains cristallins, d'âge probablement tertiaire, dans les Alpes briançonnaises (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXI, p. 701).
40. Sur deux formes nouvelles du quartz (*Id.*, t. CXXI, p. 842).
41. Sur un sondage pratiqué à Saint-Bonnet-de-Mure (Isère) (*Compte rendu sommaire des séances de la Soc. géol.*, 1895, p. VIII).
42. Sur deux roches éruptives récemment découvertes dans le massif de Chaillol (Hautes-Alpes.) (En collaboration avec M. P. Lory.) (*Id.*, 1895, p. LXXV-LXXVIII).
43. Observations diverses (*Id.*, 1895, p. CC).
44. Éloge d'Ernest Mallard (*Bull. Soc. géol.*, 3e série, t. XXIII, p. 179-191).
45. Sur la structure des grès de Fontainebleau (*Id.*, t. XXIII, p. 344-348).
46. Sur quelques nouveaux gisements de roches éruptives dans les Alpes françaises (en collaboration avec M. Kilian) (*Id.*, t. XXIII, p. 395-413).

47 Sur les terrains cristallins, d'âge probablement tertiaire, des montagnes de l'Eychauda, de Serre-Chevalier et de Prorel, près du bord oriental du massif du Pelvoux (*Id.*, t. XXIII, p. 572-588).
48. Sur les propriétés optiques et les groupements cristallins de l'oxyde de plomb orthorhombique (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie,* t. XVIII, p. 376-380).
49. Sur la forme et les propriétés optiques du phosphate tétrabasique de chaux (en collaboration avec M. Ad. Richard) (*Id.*, t. XVIII, p. 391-395).
50. Sur un quartz de Grindelwald présentant plusieurs formes nouvelles (*Id.*, t. XVIII, p. 440-457).

1896.

51. Sur le sphène de la syénite du Lauvitel (*Bull. Soc. fr. de minéralogie,* t. XIX, p. 81-85).
52. Le forménophone de M. E. Hardy (rapport présenté à la Commission du Grisou) (*Ann. des Mines,* 9e série, t. IX, p. 577-602).
53. Feuille de Briançon (*Bull. des services de la Carte géol.,* n° 53, t. VIII, p. 191-194).
54. Sur la tectonique du massif du Pelvoux (*Bull. Soc. géol.,* 3e série, t. XXIV, p. 734-758).

1897.

55. La lawsonite des Alpes piémontaises (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie* t. XX, p. 5-7).
56. Sur la bournonite de Peychagnard (*Id.*, t. XX, p. 101-110).
57. Allocution présidentielle à l'occasion de la mort de Des Cloizeaux (*Id.*, t. XX, p. 167-170).
58. Sur le cinabre et l'onofrite d'Ouen-Shan-Tchiang (*Id.*, t. XX, p. 204-210).
59. Sur la forme cristalline du borate de lithium $Bo^2O^3Li^2O\,16\,H^2O$ (*Id.*, t. XX, p. 257-258).
60. Sur le granite du Pelvoux (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences,* t. CXXIV, p. 317).
61. Sur le graduel appauvrissement en chaux des roches éruptives basiques de la région du Pelvoux (*id.*, t. CXXIV, p. 633).
62. Feuilles de Briançon et de Gap (*Bull. des services de la Carte géol.,* n° 59, t. IX, p. 427-430).

1898.

63 Notice explicative de la feuille de Valence, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec MM. Depéret, Kilian et Munier-Chalmas).
64. Sur une variété de zoïsite des schistes métamorphiques des Alpes, et sur les propriétés optiques de la zoïsite classique (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie,* t. XXI, p. 148-170).
65. Sur l'élimination de la chaux par métasomatose dans les roches éruptives basiques de la région du Pelvoux (*Bull. Soc. Géol.,* 3e série, t. XXVI, p. 165-192).

66. Contribution à l'étude des microdiorites du Briançonnais (en collaboration avec M. Kilian) (*Id.*, t. XXVI, p. 348-356).
67. Note sur divers types pétrographiques et sur le gisement de quelques roches éruptives des Alpes françaises (en collaboration avec M. Kilian) (*Id.*, t. XXVI, p. 357-364).

1899.

68. Sur la composition chimique et les propriétés optiques de la leverriérite (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie*, t. XXII, p. 27-31).
69. Notice explicative de la feuille de Tignes, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec M. Marcel Bertrand).
70. Sur la structure du Briançonnais (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXVIII, p. 466).
71. Sur une tachylyte du fond de l'Atlantique Nord (*Id.*, t. CXXVIII, p. 849).
72. Sur une tachylyte du fond de l'Atlantique Nord (deuxième note) (*Id.*, t. CXXVIII, p. 1256).
73. Les nappes de recouvrement du Briançonnais (*Bull. Soc. Géol.*, 3e série, t. XXVII, p. 47-84).
74. Microgranites de la vallée de la Guisanne (bord nord du massif du Pelvoux) (*Id.*, t. XXVII, p. 399-408).

1900.

75. Excursion XIIId du 8e Congrès géologique international (massif du Pelvoux et Briançonnais) (*Livret-Guide du 8e Congrès géol. internat.*, Paris, 1900).
76. Notice sur la collection de Minéralogie de l'École des Mines de Paris (*Ibid.*, p. 27 du dernier fascicule.)
77. Nouvelle contribution à l'étude du cadmium et du zinc métalliques (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie*, t. XXIII, p. 18-25).
78. Sur le quartz prase des cargneules de Lazer (*Id.*, t. XXIII, p. 47-48).
79. Sur l'apatite rouge de l'andésite de Guillestre (*Id.*, t. XXIII, p. 48-50).
80. Sur une association d'épidote et de zoïsite et sur les rapports cristallographiques de ces espèces minérales (*Id.*, t. XXIII, p. 50-64).
81. Notice explicative de la feuille de Briançon, de la Carte géologique détaillée de la France (en collaboration avec M. Kilian).

1901.

82. Études lithologiques dans les Alpes françaises : I. Sur le rattachement à une souche commune des diverses roches intrusives du terrain houiller du Briançonnais; II. Sur les trachytes (orthophyres) du terrain houiller des Grandes-Rousses (*Bull. Soc. Géol.*, 4e série, t. I, p. 157-178).
83. Nouveaux documents relatifs à la géologie des Alpes françaises (en collaboration avec M. Kilian) (*Id.*, t. I, p. 385-420).
84. Sur les micaschistes, les gneiss, les amphibolites et les roches vertes des

Schistes lustrés des Alpes occidentales (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 841).

85. Nouvelles observations géologiques sur la chaîne de Belledonne (*Id.*, t. CXXXIII, p. 897).
86. Sur les trois séries cristallophylliennes des Alpes occidentales (*Id.*, t. CXXXIII, p. 964).

1902.

87. Sur le granite alcalin du Filfila (Algérie) (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 371).
88. Sur le néotantalite, espèce minérale nouvelle (*Bull. Soc. fr. de Minéralogie*, t. XXV, p. 34-38).
89. Sur la célestine du Djebel Kebbouch et du Djebel Bezina (Tunisie) (*Id.*, t. XXV, p. 173-180).
90. Quatre coupes à travers les Alpes franco-italiennes (*Bull. Soc. Géol.*, 4e série, t. II, p. 411-433).

1903.

91. Sur les roches granitiques et les terrains cristallophylliens du massif des Beni Toufout, entre El-Milia et Collo (Algérie) (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 328).
92. Présentation de notes sur les granites de l'Algérie (*Bull. Soc. Géol.*, 4e série, t. III, p. 130).
93. Notice nécrologique sur A. Parran (*Id.*, t. III, p. 182).
94. Notice nécrologique sur Alexis Damour (*Id.*, t. III, p. 375-382).
95. Réponse à une Note de M. Ficheur sur les granites de l'Algérie (*Id.*, t. III, p. 425).
96. Notice sur Hippolyte Lachat, inspecteur général honoraire des Mines (*Ann. des Mines*, 10e série, t. III, p. 167-180).
97. Les schistes cristallins des Alpes occidentales : conférence faite, le 22 septembre 1903, devant le Congrès géologique international, à Vienne (Autriche) (*Comptes rendus des séances du Congrès de Vienne*).
98. Les montagnes entre Briançon et Vallouise (écailles briançonnaises, terrains cristallins de l'Eychauda, massif de Pierre-Eyrautz, etc.) avec une carte géologique et des coupes géologiques en couleur à l'échelle du $\frac{1}{50000}$ et 12 planches (*Mémoires pour servir à l'explication de la Carte géologique de la France*, Paris, chez Béranger).

CARTES GÉOLOGIQUES.

(*Feuilles de la Carte de l'État-Major à* $\frac{1}{80000}$).

Dans le Plateau central. Feuille de Saint-Étienne (1890), en collaboration avec M. Depéret.
Feuille de Monistrol (1892).

	Feuille du Puy (1893), en collaboration avec M. Boule.
	Feuille de Valence (1898), en collaboration avec MM. Depéret, Kilian et Munier-Chalmas.
	Collaboration à la feuille de Roanne.
Dans les Alpes..........	Feuille de Saint-Jean-de-Maurienne (1895), en collaboration avec MM. Marcel Bertrand, Kilian, Offret et Potier.
	Feuille de Bonneval (1895), en collaboration avec M. Marcel Bertrand.
	Feuille de Tignes (1899), en collaboration avec M. Marcel Bertrand.
	Feuille de Briançon (1900), en collaboration avec MM. Kilian, Lory et Lugeon.
	Collaboration à la feuille d'Albertville, et à la feuille, non encore publiée, de Gap.
Dans les Pyrénées......	Feuille (non encore publiée) de Saint-Jean-Pied-de-Port.

Collaboration au panneau géologique des Alpes françaises (Exposition universelle de 1900), avec MM. Marcel Bertrand et Kilian.

Collaboration à l'établissement de la deuxième édition de la Carte géologique générale de la France à l'échelle du millionième (non encore publiée).

AIDE-MÉMOIRE POUR L'ENSEIGNEMENT.

Aide-mémoire de Cristallographie.
Aide-mémoire de Pétrographie.

Ces deux brochures sont distribuées chaque année aux élèves de l'École des Mines.

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Pierre TERMIER.

MINÉRALOGIE.

I. — Espèces minérales nouvelles.

J'ai étudié en 1889 et 1890, puis, de nouveau, en 1899, un minéral feuilleté, que j'ai appelé *leverriérite*, et qui est très abondant dans certains schistes et grès du terrain houiller. Il s'y présente sous la forme de prismes tordus, que l'on avait pris autrefois pour des organismes et décrits sous le nom de *bacillarites*. L'étude de la composition chimique de la leverriérite [68] (1) m'a conduit, en dernière analyse, à ranger ce minéral dans la famille des micas. C'est un mica à eau et potasse, ayant la même formule que la muscovite, mais différant de la muscovite par ses propriétés optiques, et parce qu'il contient beaucoup d'eau et très peu de potasse, au lieu que la muscovite contient beaucoup de potasse et très peu d'eau. Dans les grès et schistes houillers, la leverriérite s'est développée *in situ*, sans doute par des actions hydro-thermales.

(1) Les nombres entre crochets indiquent le renvoi aux numéros correspondants de la liste des Mémoires publiés.

En 1891, j'ai fait connaître [18] un minéral microscopique des schistes métamorphiques des Alpes, que j'ai appelé provisoirement *zoïsite sans dispersion*. Depuis lors [64], j'ai pu isoler ce minéral. C'est une variété de zoïsite, différant de la zoïsite classique par ses propriétés optiques, et se mélangeant à celle-ci de façon curieuse. J'ai donné à la nouvelle variété le nom de *zoïsite* β, en appelant *zoïsite* α le minéral classique, décrit jadis par Des Cloizeaux.

J'ai extrait de sables stannifères, provenant du lavage des kaolins du département de l'Allier, un minéral jaune, de forte densité, assez bien cristallisé en octaèdres réguliers. C'est un tantalo-niobate de fer, manganèse et métaux alcalins, nettement différent de la tantalite. Je l'ai appelé *néotantalite* [88].

II. — Études morphologiques diverses.

J'ai consacré une assez longue étude [40, 50] à un cristal de quartz de Grindelwald, qui ne présentait pas moins de sept formes nouvelles, et sur lequel j'ai trouvé, en outre, un grand nombre de formes rares. Toutes ces faces aberrantes appartiennent à des zones dont les caractéristiques sont simples. Un fait remarquable est l'existence, au sein de ce quartz, de lamelles de calcite très minces, aplaties parallèlement à la face (0001), et qui se sont formées, pendant la cristallisation du quartz, entre certains plans réticulaires de ce dernier minéral. Ces plans réticulaires n'ont point été pris au hasard. La plupart d'entre eux ont des indices très simples, ou tout au moins appartiennent à des zones simples, et habituellement riches, du quartz. Ils ont joué le rôle de *faces limites temporaires*. Sur ces faces limites temporaires sont venues cristalliser les minces lamelles de calcite, chacune de ces lamelles ayant son axe ternaire exactement perpendiculaire à la face limite correspondante, sans qu'il y ait d'ailleurs d'autre rapport entre les axes de la calcite et ceux du quartz.

Un autre fait intéressant, c'est que ces lamelles de calcite semblent, dans la plupart des cas, s'être orientées l'une l'autre : deux lamelles voisines, formées sur deux faces adjacentes du quartz, ayant chacune un clivage parallèle à l'intersection de ces deux faces, c'est-à-dire ayant un plan de symétrie commun perpendiculaire à cette intersection.

Après ce dépôt momentané de calcite, le cristal de quartz s'est nourri de nouveau, des strates quartzeuses succédant, sur chaque face limite temporaire, à la strate de calcite. Puis, il s'est formé, au moins suivant certaines

directions, de nouvelles lames de calcite; et ces cristallisations alternatives de quartz et de calcite semblent s'être répétées un certain nombre de fois, jusqu'à ce qu'enfin, la composition de la solution venant à changer, le quartz ait pu l'emporter définitivement et revêtir sa forme habituelle.

Les formes nouvelles et les formes rares sont au nombre de ces *faces limites temporaires* qui ont été momentanément recouvertes de calcite et qui ont reparu par dissolution postérieure de la lamelle calcaire. C'est sans doute à la présence, dans l'eau-mère, d'une forte quantité de carbonate de chaux, qu'il faut attribuer et la grande variété de ces faces limites temporaires, et leurs symboles aberrants et relativement compliqués, et la production, sur chacune d'elles, d'une mince pellicule de calcite.

La syénite du Lauvitel, dans le département de l'Isère, renferme en abondance de petits cristaux de sphène, dont j'ai fait connaître la forme [51]. Ces cristaux, très aplatis parallèlement à la face (001), se disposent parallèlement les uns aux autres, tantôt jointifs, tantôt séparés, dans certains plans réticulaires du feldspath microcline. C'est une sorte de structure pegmatitique; mais, comme un même microcline renferme beaucoup de ces plans chargés de petits sphènes, et qu'il ne semble pas y avoir de relation entre les orientations de deux plans voisins, c'est une combinaison de la structure pegmatitique et de la structure pœcilitique.

En étudiant des cristaux de bournonite découverts à Peychagnard (Isère), j'ai signalé [56] six formes nouvelles de cette espèce minérale. Ces cristaux sont remarquables par le grand développement des deux zones symétriques [043] et [$0\bar{4}3$]. Dans ces deux zones, de même que dans la zone verticale, il y a des *faces cylindriques*. Le choix de la zone a été très net et sans hésitation de la part du minéral : mais il est visible que le choix des divers plans de la zone, sauf quelques-uns, comme (100) et ($03\bar{4}$), lui a été à peu près indifférent. M. Georges Friedel a, depuis lors, signalé des faits analogues dans l'anthophyllite et le gypse; et j'ai moi-même trouvé de semblables faces cylindriques dans la célestine de Tunisie. Ces observations sont importantes parce qu'elles semblent difficilement conciliables avec la théorie réticulaire, au moins telle que nous l'énonçons aujourd'hui.

J'ai décrit [58] des cristaux maclés de cinabre, provenant de la Chine centrale. Ils présentent une forme rhomboédrique nouvelle. La macle est

celle de Nikitowka, c'est-à-dire que la loi du groupement semble être une rotation de 60° autour de l'axe ternaire.

En réalité, chaque cristal est formé par l'accolement, suivant des faces du prisme (1 0 $\bar{1}$ 0), de deux espèces de cinabre, différant entre elles par le sens ou la valeur de la rotation du plan de polarisation. Ce cristal est un polyèdre *hexagonal* étoilé, manifestant extérieurement une hémiédrie holoaxe du *système sénaire :* il est formé de prismes, accolés suivant des plans parallèles aux clivages, de cinabre droit pur et de cinabre gauche pur, ou encore de deux cinabres à rotations inverses, mais eux-mêmes mélangés et n'ayant qu'un pouvoir rotatoire réduit. En d'autres termes, le cinabre en question, *par toutes ses propriétés,* semble être hexagonal et non pas ternaire. L'axe principal est véritablement d'ordre 6, et il y a six axes binaires dans le plan perpendiculaire.

J'ai repris [77], sur des cristaux de zinc et de cadmium métalliques préparés par M. H. Le Chatelier, l'étude morphologique commencée par George Williams et Burton. L'isomorphisme des deux métaux est beaucoup plus parfait que ne l'avait dit Williams. Ils sont hexagonaux, ou peut-être rhomboédriques : le rapport $\frac{c}{a}$ est égal à 1,335 pour le cadmium, et à 1,356 pour le zinc. Outre les cristaux nets, on obtient, par distillation dans le vide, des sortes de boutons polyédriques, à facettes planes. J'ai compté jusqu'à 78 facettes sur un seul bouton.

En piquant *normalement*, avec une aiguille, en un point quelconque, une de ces facettes, on donne naissance, *dans tous les cas,* à une figure de glissement dont la symétrie est hexagonale. La figure est la même pour le cadmium que pour le zinc. Les boutons polyédriques de cadmium et de zinc sont donc *toujours* constitués par des *buissons* de cristaux, divergeant du centre de la gouttelette qui, par un refroidissement, est devenue le bouton polyédrique. Chaque facette du polyèdre est normale à l'axe principal de l'un des cristaux composants : de sorte que le nombre des facettes est le nombre même des cristaux élémentaires.

On sait depuis longtemps que le protoxyde de plomb est dimorphe, avec une forme orthorhombique et une forme quadratique. J'ai décrit en 1895 [48] de curieux groupements cristallins, dans de très petits cristaux d'oxyde orthorhombique préparés par M. H. Le Chatelier. Ces groupements sont entièrement analogues à ceux de la staurotide.

J'ai fait remarquer que l'on aurait pu facilement, par la théorie de Mallard, prévoir tous ces groupements, les paramètres de l'oxyde orthorhombique (déterminés par Nordenskiöld) étant très voisins de ceux de la staurotide, ou de ceux de la christianite, et très voisins des paramètres *orthorhombiques* du cube $(1 : \sqrt{2} : \sqrt{2})$.

Tout dernièrement [89], j'ai eu l'occasion d'étudier de beaux cristaux de célestine provenant de Tunisie. La célestine est très fréquente dans ce pays, et, en général, elle s'y présente sous ses formes habituelles. Mais dans un gisement (Djebel Kebbouch), elle affecte une forme entièrement aberrante avec prédominance de la face (035), laquelle n'avait jamais été signalée. Dans ces cristaux du Kebbouch, la zone de l'axe des y montre des *surfaces cylindriques* presque continues, allant, tantôt de (100) jusqu'à (304), tantôt de (100) jusqu'aux environs de (201).

III. — Les deux zoïsites et l'épidote.

Après avoir isolé et décrit [64] la *zoïsite* β et montré ses rapports avec la *zoïsite* α, j'ai été ramené à l'étude de ces silicates par la découverte d'une association géométrique de zoïsite α et d'épidote [80]. Cette association se rencontre dans une roche à prehnite, épidote et zoïsite du fond du Queyras, récoltée par M. Kilian; elle résout d'une façon complète et définitive le problème, jusque-là controversé et resté obscur, des rapports de la zoïsite et de l'épidote.

Dans cette association, les deux ellipsoïdes de polarisation, celui de l'épidote, et celui de la zoïsite α, placent (à quelques degrés près) en coïncidence les trièdres trirectangles de leurs axes principaux,

n_g	(zoïsite α) étant à peu près parallèle à	n_p	(épidote)
n_m	»	n_g	»
n_p	»	n_m	»

D'autre part, la loi des groupements de zoïsite α et de zoïsite β est la suivante :

n_g	(zoïsite α) parallèle à	n_g	(zoïsite β)
n_m	»	n_p	»
n_p	»	n_m	»

Rapprochant ces faits nouveaux de ce que nous savions déjà sur la

zoïsite et l'épidote, j'ai montré que tout s'explique aisément par le trimorphisme du silicate mixte $H^2Ca^4(Al^2, Fe^2)^3Si^6O^{26}$; les trois formes ayant à peu près le même réseau et, par suite, à égalité de composition chimique, la même densité.

La première forme est la *forme épidote*. Rare dans les variétés peu ferreuses, elle devient la plus stable dès que la teneur en Fe^2O^3 dépasse $\frac{5}{100}$. La molécule semble être exactement binaire, et le réseau est presque exactement orthorhombique.

La deuxième forme est la *forme zoïsite* α. De même que la troisième forme, elle est stable dans les variétés peu ferreuses, et se fait très rare dès que la teneur en Fe^2O^3 dépasse $\frac{4}{100}$. La molécule est triclinique, mais pseudo-rhombique, et même pseudo-quadratique. Le réseau n'est pas rigoureusement le même que dans la première forme, mais la différence est assez petite pour que les deux réseaux puissent coexister dans le même édifice cristallin. L'ellipsoïde de polarisation est très différent.

La troisième forme est la *forme zoïsite* β. Stable dans les mêmes conditions de composition chimique que la deuxième forme, elle est moins fréquente. Le réseau semble être rigoureusement identique à celui de la zoïsite α. La molécule, certainement triclinique, est encore pseudo-rhombique, et même pseudo-quadratique. L'ellipsoïde de polarisation est très différent des deux premiers.

Ainsi, deux réseaux identiques (ceux des deux zoïsites), et un troisième réseau (celui de l'épidote) très peu différent; trois ellipsoïdes de polarisation nettement dissemblables, mais orientant cependant, à quelques degrés près, suivant les trois mêmes directions, leurs axes principaux : tel est, en résumé, ce trimorphisme, qui mérite, par sa netteté, de devenir classique.

Je crois que, si nous savions reproduire le silicate alumineux pur, et le silicate ferreux pur, nous constaterions leur *isotrimorphisme*. Jusqu'ici, nous ne connaissons, dans la nature, que le mélange A^pF^q (en appelant A le silicate alumineux et F le silicate ferreux), mélanges qui présentent les formes zoïsites lorsque q est très petit par rapport à p, et la forme épidote dans tous les autres cas.

Les formes zoïsites, qui sont en réalité tricliniques et plus dissymétriques que la forme épidote, corrigent, par des macles multipliées, leur dissymétrie et se présentent à nous sous une apparence orthorhombique. La forme épidote se présente à nous sous une apparence clinorhombique; en réalité, elle est très sensiblement orthorhombique.

IV. — Observations minéralogiques dans les roches.

Au cours de mes travaux de pétrographie, j'ai eu de très nombreuses occasions d'observer des particularités minéralogiques, plus ou moins intéressantes, qui sont mentionnées dans divers Mémoires. Je ne puis rappeler ici que les plus importantes.

En collaboration avec M. Michel-Lévy [5], j'ai décrit une curieuse association d'andalousite et de sillimanite à axes parallèles, dans un gneiss à cordiérite du Mont-Pilat.

J'ai signalé [11] l'existence de l'ægyrine dans certains phonolites du Velay. M. Boule a décrit, après moi, d'autres phonolites de la même région renfermant ce même minéral.

Les argiles de Saint-Pierre-Eynac contiennent, au voisinage du phonolite, divers minéraux de métamorphisme, parmi lesquels le pyroxène, l'amphibole et le pléonaste [12].

Dans le terrain houiller de Saint-Étienne, à Montraynaud, j'ai décrit [17] des filons d'orthose et de quartz, où ces deux minéraux forment des zones parallèles aux épontes, tout comme les minerais métalliques dans les filons métallifères.

Le Permien et le Trias du massif de la Vanoise, dont j'ai fait connaître [18] l'intense métamorphisme, renferment des minéraux variés : rutile, tourmaline, zircon, sphène, glaucophane, chlorite, mica, chloritoïde, albite, orthose, etc. Le glaucophane de la Vanoise est remarquable par la position un peu aberrante de son axe n_g. Le rutile présente des groupements intéressants. Les feldspaths, généralement sans forme géométrique extérieure, se sont développés au sein des phyllites, qu'ils ont repoussées et gonflées au fur et à mesure de leur croissance. Un fait curieux, c'est que ces feldspaths sont traversés par des files de cristaux de rutile et d'ilménite, qui se poursuivent, en dehors du cristal feldspathique, à travers la roche. Tantôt ces files pénètrent sans déviation dans le feldspath; tantôt leur orientation change dès qu'elles entrent dans l'albite ou l'orthose, et alors c'est généralement dans l'un des deux clivages du feldspath qu'elles élisent domicile. Les divers minéraux que j'ai nommés ont pris naissance et ont grandi *in situ*, sous l'influence du *métamorphisme régional*.

On retrouve ces mêmes minéraux, dans les mêmes conditions de forme et de gisement, au sein des assises cristallines du Petit-Mont-Cenis [34].

En étudiant au microscope les grès de Fontainebleau, j'ai constaté [45]

que les grains de quartz, qui constituaient le sable initial, devenu plus tard un grès, se sont peu à peu nourris, et que les interstices qui subsistaient encore après ce nourrissage ont été finalement comblés par du quartz grenu. C'est du moins le cas des *grès parfaits*, dans lesquels il ne reste plus aucun vide.

Le nourrissage régulier des grains de sable s'est fait par superposition de petites couches quartzeuses ayant chacune l'orientation optique du grain correspondant, épaisses de quelques millièmes de millimètre, parfois séparées les unes des autres par un enduit d'oxyde de fer. La dernière de ces auréoles, la plus récemment formée, contient des fibres de calcédoine normales à la surface. Après la production de cette auréole calcédonieuse, le nourrissage a cessé, et les interstices se sont remplis, sans doute rapidement, de quartz confusément cristallisé.

Si les eaux qui circulaient à travers la masse avaient eu une composition plus constante, il est probable que le grès fût devenu peu à peu un *quartzite*, le nourrissage des grains allant jusqu'au moulage mutuel, c'est-à-dire jusqu'à l'effacement de tout caractère détritique. Ici, grâce à un changement important dans la composition des eaux, il y a eu production momentanée de calcédoine, puis comblement brutal par du quartz confus ; et c'est pourquoi la forme détritique des grains est demeurée et demeurera à tout jamais visible, quelle que soit la compacité de la roche ainsi produite.

J'ai signalé, en 1897 [61], un curieux phénomène de *métasomatose* des roches, que j'ai appelé *décalcification*. C'est l'élimination graduelle de la chaux par l'action des eaux superficielles. Ce phénomène est depuis longtemps connu dans le pyroxène, qui d'abord s'ouralitise en perdant un peu de chaux, et ensuite se serpentinise ou se chloritise en perdant ce qui lui restait de cette terre. On ne l'avait point encore signalé dans les feldspaths. Dans cette décalcification des feldspaths, l'édifice cristallin demeure inaltéré ; mais l'anorthite, qui y habitait, mêlée à l'albite, disparaît peu à peu, remplacée par de la matière étrangère venue de l'extérieur, et qui est de la chlorite ou de la serpentine. A la fin, il ne reste plus que de l'albite et des corps étrangers ; et il y a des roches où *tous* les cristaux feldspathiques, jadis très riches en anorthite, sont ainsi complètement décalcifiés.

En décrivant une roche vitreuse du fond de l'Atlantique nord [72], j'ai signalé un cas de *polychroïsme* très net *dans un verre*. Ce polychroïsme résulte sans doute de tensions intérieures. Mais il est bien remarquable qu'il ne soit pas accompagné de biréfringence.

GÉOLOGIE ET PÉTROGRAPHIE.

I. — Études régionales dans le Plateau Central.

De 1886 à 1890, mes travaux de géologie et de pétrographie ont eu pour unique objet la région orientale du Plateau Central français. A partir de 1890 et jusqu'en 1897, j'ai continué et peu à peu achevé les travaux ainsi commencés, dans les loisirs que m'a laissés l'exploration des Alpes. J'ai fait entièrement une feuille de la Carte géologique détaillée, celle de Monistrol, et, en plus, la moitié de la feuille de Saint-Étienne, la moitié de la feuille du Puy, et la moitié de la feuille de Valence.

Cette région du Plateau Central est formée de terrains cristallophylliens, gneiss et micaschistes, souvent injectés et comme imbibés de granite, traversés par d'innombrables filons granitiques (*granulite* de MM. Fouqué et Michel-Lévy), et passant peu à peu, en profondeur, à du granite d'abord gneissique, puis de plus en plus homogène. Les terrains cristallophylliens sont plissés régulièrement. Les plis, qui ne sont ni très serrés, ni très nombreux, sont dirigés vers le Nord-Est. Dans les synclinaux, on observe des lambeaux d'un terrain mi-partie clastique, mi-partie cristallophyllien, et aussi des témoins, plus ou moins importants, de terrain houiller. Le terrain houiller est discordant sur les micaschistes : et donc ceux-ci étaient déjà plissés, ou tout au moins ondulés avant l'époque houillère. Mais le plissement principal de la région est postérieur au dépôt du terrain houiller. Les plis en question appartiennent ainsi à la chaîne *varisique*, ou *hercynienne*, de MM. E. Suess et Marcel Bertrand.

Cette chaîne hercynienne a été peu à peu démantelée et rasée, dans la suite des âges, et l'on voit, sur la tranche des assises cristallophylliennes, reposer divers terrains plus ou moins récents : le Trias et le Jurassique marins, sur les plateaux de l'Ardèche ; l'Oligocène lacustre, dans le Forez et le Velay ; des cailloutis, enfin, qui appartiennent au Miocène ou au Pliocène, un peu partout. Pendant le Pliocène et le Pléistocène, des roches éruptives sont montées à travers les terrains cristallins et à travers leur couverture oligocène, et de nombreux volcans (nombreux surtout dans le Velay) ont

couvert le pays de leurs laves et de leurs cendres. L'érosion postérieure n'a laissé subsister que des témoins de cette période de grande activité volcanique.

Terrain cristallophyllien. — Je me suis attaché tout d'abord à l'étude *stratigraphique* du terrain cristallophyllien, considéré comme un terrain sédimentaire transformé par *métamorphisme régional*. M. Michel-Lévy venait de publier ses idées à ce sujet, et de nous enseigner que les gneiss et les micaschistes sont d'anciens sédiments modifiés par le voisinage d'un magma granitique. Et le même savant venait aussi de publier un premier essai de stratigraphie cristallophyllienne, concernant les gneiss et micaschistes du Lyonnais. Ces deux ouvrages de M. Michel-Lévy m'ont inspiré mes premières recherches, et le premier, celui qui renferme l'exposé de la théorie du terrain cristallophyllien, a été mon guide pendant de longues années, puisque voici dix-sept ans que j'étudie les terrains cristallins du Plateau Central et des Alpes, et que mes idées, à leur endroit, ne sont, encore aujourd'hui, que le développement naturel et la généralisation de celles de mon maître.

L'étude stratigraphique du terrain cristallophyllien n'est pas possible partout ; mais elle est très facile dans la région de Saint-Étienne, et notamment dans le massif du Mont-Pilat et dans les plateaux qui, à l'Est de ce massif, dominent le Rhône [8]. On y peut distinguer quatre étages, assez régulièrement superposés. En haut, des micaschistes chloriteux et sériciteux, qui forment le substratum immédiat du terrain houiller de Saint-Étienne. Puis, d'autres micaschistes, alternant avec des schistes quartziteux. Ensuite, des gneiss riches en mica noir et bien lités. Et enfin des gneiss à cordiérite passant insensiblement au granite. Cette division en quatre étages permet d'étudier la tectonique du massif du Mont-Pilat, absolument comme si ce massif était constitué par des terrains paléozoïques ou secondaires non métamorphiques. On constate alors que cette tectonique est relativement simple.

Malheureusement, cette étude ne peut être poursuivie ni vers le Nord, ni vers le Sud : au Nord, parce que les plis du Pilat se cachent sous les formations plus récentes de la vallée du Rhône; au Sud, parce que le granite monte de plus en plus haut dans la série, et que tous les termes de cette série se transforment alors en des gneiss granitoïdes, entièrement, ou à peu près entièrement, semblables. Le prolongement méridional des plis du Pilat (feuilles de Monistrol et de Valence) n'est indiqué que par la

direction des strates. Sur la feuille de Valence, beaucoup de gneiss ne diffèrent guère, quant à leur composition chimique, du granite fondamental de la région; et l'on pourrait mettre en doute leur origine sédimentaire, si l'on n'y rencontrait, çà et là, des amphibolites nettement stratiformes [63].

L'étage supérieur des micaschistes de Saint-Étienne est peut-être représenté, sur la feuille de Valence, par les schistes de La Voulte, des Ollières et d'Alboussière. Ceux-ci forment un complexe où alternent les roches quartzo-séricíteuses, les chloritoschistes, les micaschistes à grenat, tourmaline et biotite, les schistes serpentineux noirâtres et de rares niveaux amphiboliques. Vers le bord Ouest de la feuille de Monistrol [21], les chloritoschistes et les micaschistes à séricite de Berbezit, qui forment une bande dirigée Nord-Sud, correspondent vraisemblablement au même étage.

J'ai appelé *gneiss granulitiques* (pour employer le nom appliqué par M. Michel-Lévy à des roches semblables) des gneiss nettement stratiformes, différant des gneiss ordinaires de la même région par une couleur plus claire, une acidité plus grande, une teneur en alcalis plus forte, une moindre teneur en chaux, magnésie et fer. Beaucoup de ces *gneiss alcalins* portent des traces évidentes d'écrasement et de laminage. D'autres passent localement à des masses interstratifiées de leptynite ou granulite schisteuse : et c'est pour cela que l'on peut conserver le nom de *gneiss granulitique*, qui réserve suffisamment la question d'origine. Sur la feuille de Saint-Étienne, ces gneiss se séparent mal des gneiss ordinaires. Sur les feuilles de Valence et de Monistrol, ils reposent sur le granite. Leurs couches sont *horizontales* ou faiblement ondulées : ce sont elles, par conséquent, qui forment les plus hauts sommets de la région cristalline. En rapprochant ce fait (horizontalité des assises) des phénomènes d'écrasement et de laminage que le microscope permet de constater, j'en arrive à me demander si ces masses de gneiss alcalins ne sont pas des lambeaux de recouvrement, d'origine plus ou moins lointaine [63].

Les amphibolites sont fréquentes dans cette région du Plateau central, et, par la facilité avec laquelle on peut suivre leurs affleurements, elles rendent de grands services au géologue qui veut étudier la tectonique du pays. Elles apparaissent, soit dans les chloritoschistes inférieurs, soit plutôt dans les gneiss supérieurs, au voisinage de leur limite mutuelle. On y trouve beaucoup de sphène. Le quartz est généralement peu abondant. Il y a du feldspath (labrador ou oligoclase). Des lits de pyroxénites à diopside, riches en grenat et hornblende, alternent souvent avec les amphibolites [8, 15, 21, 63].

Sur l'âge de cette série cristallophyllienne, nous ne savons rien, sinon qu'elle est antérieure au Culm. Elle est probablement fort ancienne. Sur la carte géologique détaillée, j'ai marqué de la lettre X (Précambrien) les lambeaux d'un terrain mi-partie clastique, mi-partie cristallin, que l'on trouve, çà et là, dans les synclinaux, terrain qui est donc plus jeune que la série cristallophyllienne, et qui est fort semblable aux schistes et cornes du Beaujolais décrits par M. Michel-Lévy. Mais c'est là une qualification provisoire, et la question d'âge doit être entièrement réservée, aussi bien pour les terrains X que pour les gneiss et les micaschistes.

Roches massives. — Le granite présente diverses variétés qui semblent passer les unes aux autres [8, 15, 21, 25, 63].

Le *granite fondamental* de la région, celui qui passe aux gneiss à cordiérite inférieurs, est très souvent gneissique, presque toujours micacé, souvent riche en cordiérite. Très variable et très peu homogène dans le détail, il est, dans l'ensemble, d'une composition remarquablement constante. Les intercalations gneissiques que l'on y trouve paraissent être des accidents de structure, plutôt que des enclaves sédimentaires métamorphosées.

Le *granite porphyroïde* est un faciès de bordure du granite fondamental. Il forme lisière autour des lambeaux de vieux schistes, notamment aux environs de Vienne, de Tournon et de la Chaise-Dieu. Les grands cristaux de feldspath sont d'anorthose. Il existe un hiatus marqué dans la consolidation; et une partie du mica noir est postérieure aux gros cristaux de feldspath.

Sur le bord Sud de la feuille de Valence, j'ai observé une autre forme de bordure du granite fondamental : c'est un granite à grain fin, souvent aplitique, passant d'autres fois à un véritable microgranite.

Dans le granite gneissique et dans le granite porphyroïde de la feuille de Valence, j'ai signalé de curieuses *concentrations magnésiennes*, en forme d'amas grossièrement sphériques, parfois très petits (moins de 1^m), parfois très gros (200^m ou 300^m). Le plus souvent, ce qui se forme ainsi, c'est une sorte de syénite à pyroxène, hornblende et mica noir. Quelquefois, la roche est plus basique et ressemble à une diorite, à un gabbro, voire à une norite à anthophyllite. Les types basiques passent, par métasomatose, à la serpentine. Je ne doute pas, aujourd'hui, que les amas de *lherzolite* et de serpentine, que j'ai autrefois [8, 15, 21] signalés et décrits dans le granite des feuilles de Saint-Étienne et de Monistrol, n'aient

la même origine. Ce sont de simples *concentrations magnésiennes*, c'est-à-dire de simples accidents de structure du granite.

Il y a, par contre, mais plus rarement, dans le même granite, des *concentrations alcalines*, sortes de roches pegmatoïdes, très peu homogènes, formant des amas aux contours très irréguliers, et non pas des filons comme les véritables pegmatites [63].

Les *aplites* (*granulites* de la carte) sont, dans toute la région que j'ai étudiée, extrêmement fréquentes. Ce sont, essentiellement, des *roches de filons* : cependant, une roche toute semblable forme, sur le bord Sud de la plaine du Forez, un véritable massif, dont la superficie peut atteindre 20^{km^2}. Toutes ces aplites sont riches en alcalis et silice, et pauvres en magnésie. Beaucoup renferment du mica blanc; quelques-unes de la tourmaline; d'autres, plus rares, des grenats. La forme des filons est souvent compliquée et curieuse (feuille de Monistrol). Sur la feuille de Saint-Etienne, ils ont, pour la plupart, une direction Nord-Est, c'est-à-dire parallèle aux plis; sur la feuille de Monistrol, ils sont dirigés vers le Nord-Ouest ou le Nord. Des aplites identiques apparaissent (feuille de Valence) entre les schistes et le granite, et sont donc des formes de bordure de celui-ci.

Roches volcaniques tertiaires. — J'ai repris l'étude des roches volcaniques du Velay, commencée par Tournaire, et j'ai fait connaître, dès 1887 [2], la véritable succession des éruptions dans la région du Mézenc. Outre les phonolites et les basaltes, bien connus depuis longtemps, il y a, dans cette série volcanique, des trachytes et des andésites; et les basaltes s'y rencontrent à plusieurs niveaux.

En 1890 [12], j'ai décrit d'une façon détaillée la région volcanique du Meygal, au Nord du Mézenc. La succession des éruptions y est la même qu'au Mézenc, et comprend six termes, qui sont, de bas en haut : basaltes; trachytes et phonolites inférieurs, riches en apatite et hornblende; andésites augitiques et micacées; basalte porphyroïde; phonolites supérieurs, parfois à néphéline, parfois à ægyrine; basalte des plateaux.

Les andésites augitiques et micacées prennent un très grand développement dans la région du Mézenc. Elles se distinguent nettement des basaltes par leur richesse relative en alcalis (3 à 4 pour 100). Les alcalis sont contenus, partie dans le mica noir, partie dans les feldspaths : l'anorthose est fréquente.

Les études de M. Boule, commencées après les miennes et poursuivies parallèlement aux miennes, ont confirmé toutes mes observations. Mais

M. Boule, grâce à sa compétence paléontologique, a pu aller plus loin que je n'avais fait et a précisé l'âge de certaines coulées. Nous savons, grâce à lui, que les basaltes inférieurs du Velay sont miocènes, et que les phonolites supérieurs et les basaltes supérieurs du Mézenc sont antérieurs aux sables à *Mastodon arvernensis*. La feuille du Puy et la notice explicative de cette feuille [25] sont dues à notre collaboration. J'ai dirigé, en 1893, les excursions de la Société géologique de France dans le pays des phonolites et des andésites, au Meygal et au Mézenc [28, 29, 30, 31].

Prolongement vers le Nord du bassin houiller de Saint-Étienne. — Ayant défini l'allure des plissements *hercyniens* dans la région comprise entre Saint-Étienne et la vallée du Rhône, j'ai été tout naturellement amené à rechercher quel pouvait être, vers le Nord-Est, le prolongement du synclinal qui correspond au bassin houiller de Saint-Étienne. Cette question, comme toutes celles qui touchent aux prolongements des bassins houillers, a une importance pratique évidente.

Si l'on jette les yeux sur la carte des plis hercyniens annexée à mon mémoire [8], on voit que les trois synclinaux de Saint-Etienne, de Vienne et de Sarras convergent vers le Nord-Est, et tendent, au fur et à mesure qu'ils approchent du point de concours, à s'infléchir vers le Nord. Le point de concours n'est malheureusement pas visible, car, à partir du Rhône, les terrains primaires sont presque partout cachés par les dépôts tertiaires et quaternaires.

J'ai émis l'avis que les assises houillères d'ailleurs très redressées, trouvées, par sondage, à Toussieu, devaient appartenir, non pas au synclinal de Saint-Etienne, mais à celui de Vienne, et que, pour trouver le prolongement du synclinal de Saint-Etienne, il était prudent de reporter les sondages vers le Nord-Ouest ou le Nord.

Conformément à cette indication générale, un nouveau sondage a été entrepris, près de Saint-Bonnet-de-Mure, dont les résultats ont été exactement ceux que l'on pouvait prévoir d'après ma théorie [38, 41]. Le sondage est tombé en plein synclinal. Sous les terrains tertiaires, il a traversé le Lias et le Trias, et enfin, à 650m environ du jour, il a pénétré dans le terrain houiller. Il est probable que ce terrain va se prolongeant, encore très loin, vers le Nord ou le Nord-Nord-Est; il est seulement à craindre que l'exploitation de la houille n'y devienne bientôt très difficile, en raison de l'épaisseur croissante et de la nature aquifère des morts-terrains.

II. — Études régionales dans les Alpes.

J'ai travaillé pendant douze années dans les Alpes françaises, et dans les massifs dont l'accès est le plus difficile, et qui sont parmi les plus compliqués, quant à la structure. J'ai dressé les cartes géologiques détaillées du massif de la Vanoise, du massif des Grandes Rousses, du massif du Pelvoux, et, tout dernièrement, la carte géologique au $\frac{1}{50000}$ des montagnes comprises entre Vallouise et Briançon, montagnes où se trouve certainement la clef de la structure des Alpes françaises. Ces cartes sont accompagnées de coupes et de Mémoires descriptifs [18, 32, 54, 98]. En outre, j'ai exploré la partie Sud de la chaîne de Belledonne, les deux versants, français et italiens, du massif de la Levanna; et j'ai dressé (feuille de Tignes) une carte géologique provisoire d'une partie du Val-Grisanche, du Val-de-Rhêmes, du Val-Savaranche et du massif du Grand-Paradis. Les feuilles de la carte géologique détaillée, qui comprennent les régions que j'ai étudiées, sont au nombre de huit : Saint-Jean-de-Maurienne, Albertville, Tignes, Bonneval, Briançon, Gap, Vizille et Grenoble.

Massif de la Vanoise. — Ce massif est, en grande partie, constitué par des assises très cristallines, micaschistes, schistes à noyaux feldspathiques, glaucophanites, sur lesquelles repose le Trias.

En 1861, l'ingénieur Lachat avait signalé, sur le bord méridional du massif, près de Modane, un faciès métamorphique du terrain houiller, mais cette découverte, vivement contestée par Charles Lory, avait été bien vite oubliée. Plus tard (1888), M. Zaccagna avait rapporté au Permien métamorphique les schistes plus ou moins cristallins de Modane, et aussi les schistes semi-cristallins des environs de Bozel, au Nord-Ouest de la Vanoise. Mais il n'était venu à l'esprit de personne d'englober dans le Permien ou le Houiller les assises cristallophylliennes, si profondément métamorphiques, du haut massif. Charles Lory, sur ses minutes de carte, les rapportait au *terrain primitif;* M. Zaccagna les plaçait dans le Prépaléozoïque.

J'ai démontré, en 1891 [18], que les micaschistes, les gneiss et les glaucophanites du haut massif sont, de même que les schistes semi-cristallins de Modane et de Bozel, des assises *permiennes* métamorphiques. Le métamorphisme, dans le terrain permien de cette région, augmente graduelle-

ment et rapidement de l'Ouest vers l'Est. A partir d'une ligne qui coïncide à peu près avec le bord occidental du haut massif, les assises permiennes deviennent toutes et totalement cristallines; et alors il n'y a plus aucune différence essentielle de structure intime entre ces micaschistes permiens et les micaschistes du terrain cristallophyllien le plus ancien.

Ma démonstration est établie sur deux faits : d'abord l'augmentation graduelle du métamorphisme, révélée par l'étude micrographique des schistes; en second lieu, l'existence, à Laisonnay, sous les micaschistes permiens, d'un dôme de terrain houiller où les assises ne sont que semi-métamorphiques, où l'on exploite de l'anthracite, et où l'on peut observer des empreintes végétales.

La loi d'accroissement du métamorphisme de l'Ouest à l'Est n'est pas applicable au seul Permien; elle est vraie aussi, dans la Vanoise, pour le Houiller et pour le Trias. Ce dernier terrain est constitué par des quartzites, des schistes, des marbres phylliteux et des calcaires. J'ai établi la stratigraphie exacte de cette série, et montré l'intense métamorphisme de quelques-uns de ses termes.

La croyance en l'ancienneté *nécessaire* des terrains cristallophylliens est si profondément enracinée dans l'esprit des géologues que mes conclusions, relativement à l'âge permien des micaschistes de la Vanoise, ont paru, aux uns, absurdes, aux autres, téméraires [26], jusqu'au jour (en 1894) où M. Marcel Bertrand vint annoncer que ses propres études, sur la région qui fait suite à la Vanoise du côté Nord, confirmaient absolument ma manière de voir. Dans cette région, qui est la haute Tarentaise, le Houiller est atteint par le métamorphisme presque autant que le Permien, et l'on ne peut plus distinguer ces deux étages : leur ensemble constitue ce que M. Marcel Bertrand a appelé le *Permo-Houiller métamorphique*, ce que j'appelle aujourd'hui la *série cristallophyllienne permo-houillère* [86]. Dès 1894, M. Marcel Bertrand annonçait que la plus grande partie, sinon la totalité des gneiss du Piémont, devait être attribuée à ce Permo-Houiller métamorphique. C'était, pour ma théorie, une confirmation et un développement que je n'eusse jamais osé espérer.

Massifs du Petit-Mont-Cenis, de la Levanna et du Grand-Paradis. — C'est pour vérifier, à mon tour, la généralisation de M. Marcel Bertrand, que je fis, en 1893 et en 1894, l'exploration de ces massifs. Les micaschistes du Petit-Mont-Cenis et du massif d'Ambin sont [34] entièrement assimilables à ceux de la Vanoise, dont ils présentent tous les types pétrogra-

phiques. Quand aux gneiss de la Levanna et du Grand-Paradis, qui, pétrographiquement parlant, diffèrent des roches de la Vanoise par une feldspathisation beaucoup plus avancée, ils sont encore du même âge [37]. On ne peut les séparer des gneiss de l'Invergnan et du Val-Grisanche. Or, ces derniers contiennent çà et là, presque inaltérées, des assises à anthracite, et passent latéralement aux roches permo-houillères métamorphiques de la Tarentaise. Il n'y avait donc plus de doute : la série cristallophyllienne permo-houillère s'étend en Italie, et englobe tous les gneiss des vallées piémontaises.

Les géologues italiens, d'abord très hostiles à cette idée et très défiants à l'égard de nos observations, se sont peu à peu convaincus de l'exactitude de celles-ci et de la justesse de celle-là. Leurs propres découvertes, dans ces dernières années, ont confirmé, de la façon la plus éclatante, toutes les prévisions de M. Marcel Bertrand, et toutes les miennes.

Massif des Grandes-Rousses. — Le massif des Grandes-Rousses, qui n'est, en somme, que le prolongement Nord d'une partie du massif du Pelvoux, est constitué par un terrain cristallophyllien ancien, enclavant de nombreux amas granitiques, et par des terrains plus récents que ce Cristallophyllien : Houiller, Trias et Lias.

J'ai consacré à ce massif une longue monographie [32]. J'ai décrit, avec beaucoup de détails micrographiques, les roches cristallophylliennes, les sédiments houillers et les roches éruptives houillères, et analysé les plissements des divers âges.

De l'étude du Cristallophyllien, je rappellerai seulement la constatation nette et précise de quelques assises de *conglomérats*, intercalées dans les gneiss et les micaschistes. Depuis lors, on a fait des découvertes semblables, sur bien des points et dans les séries cristallophylliennes les plus anciennes.

Dans le Houiller, j'ai signalé [22] la présence d'énormes coulées de roches volcaniques (*orthophyres* ou *trachytes*). L'épaisseur de ces coulées *peut atteindre mille mètres*. Au col de la Croix-de-Fer, elles sont relevées en anticlinal, et le chemin muletier les traverse sur plus de 2^{km} de longueur. Il est surprenant qu'avec un pareil développement ces roches soient demeurées ignorées jusqu'en 1892. Mais les nappes, fortement redressées et devenues schisteuses, ont, de loin, l'aspect de chloritoschistes. Les trachytes, ou orthophyres, des Grandes-Rousses, ressemblent aux porphyres de la Windgälle; ils ressemblent surtout, pour l'œil nu, aux phonolites. La-

mines, ils se confondent facilement avec des schistes à chlorite ou à séricite. Ce sont des roches très feldspathiques, ne renfermant, comme minéral magnésien, que le mica noir, et ne contenant que très peu de quartz. Les coulées alternent avec les assises houillères. Dans celles-ci, il y a fréquemment des bancs épais de *conglomérats trachytiques*, analogues aux *grès porphyriques* du Culm de la Loire : on trouve aussi de véritables tufs. Certaines coulées sont scoriacées.

L'étude tectonique des Grandes-Rousses est fort curieuse. Il y a des plis antérieurs au Trias (plis *hercyniens*), et d'autres postérieurs au Lias (plis *alpins*). Les plis *alpins* sont facilement observables; ils constituent une série isoclinale, déversée vers l'Ouest, et ils sont remarquables par leur extrême inégalité et par les ondulations, parfois très accusées et très brusques, de leurs lignes axiales. J'ai montré que ces ondulations se coordonnent suivant une sorte de système *orthogonal* aux plis [32], qui retentit, comme bien on pense, sur les formes géographiques. M. Lugeon et M. Pierre Lory ont, depuis, observé d'autres exemples de plis orthogonaux accessoires abaissant et relevant les axes d'un faisceau de plis parallèles.

Je me suis attaché à reconstituer, par-dessous les plis *alpins*, les plis antérieurs au Trias, les plis de l'ancienne chaîne *hercynienne*. Cette chaîne était esquissée avant le dépôt du Houiller; mais son relief n'est devenu vraiment accentué qu'après ce dépôt.

D'une façon générale, les plis *alpins* se sont établis dans la direction même des anciens plis; mais il y a, dans le détail, de forts écarts, allant souvent à 40°. Les plis *alpins* sont beaucoup plus nombreux et plus serrés que les plis *hercyniens*. Les plis les plus profonds du nouveau système ne se sont pas formés sur l'emplacement des plis les plus profonds de l'ancienne chaîne. Je ne crois donc pas que la règle de permanence des plis énoncée par Godwin Austen, et étendue ensuite par M. Marcel Bertrand, puisse être considérée comme une loi générale.

Massif du Pelvoux [54, 60, 75, 81]. — Le massif du Pelvoux, dont le plus haut sommet atteint l'altitude de 4103^{m}, est constitué, de même que les Grandes-Rousses, par un faisceau de plis parallèles, localement surélevé. On y observe : des terrains cristallophylliens anciens, d'âge indéterminé ; plusieurs amas granitiques; du Houiller, à peu près concordant sur le Cristallin ; du Trias, discordant sur les terrains précédents ; du Lias et du Bajocien, concordant avec le Trias et ayant certainement recouvert toute la région ; enfin des calcaires nummulitiques et du Flysch (Priabonien et base

de l'Oligocène), en transgression sur les autres termes, et ayant recouvert les régions Est et Sud du massif.

Le granite du Pelvoux est un *granite alcalin*, à peu près dépourvu de chaux et de magnésie, et dont les éléments essentiels sont l'orthose, l'albite et le quartz. Le feldspath y existe à deux états : l'albite et la cryptoperthite. On observe des aplites, extra-siliceuses, soit en filons dans le granite, soit en apophyses dans les micaschistes et les gneiss, soit en bordure des massifs granitiques. Le bord de ces massifs est le plus souvent très net. Il n'y a jamais d'*endomorphisme;* et le métamorphisme exomorphe développé par le granite a été, presque partout, peu intense. Sur beaucoup de points, il est visible que les micaschistes et les gneiss avaient atteint toute leur cristallinité avant la *mise en place* de la roche massive : et alors, saturés qu'ils étaient déjà de silice et d'alcalis, ils sont restés indifférents. Ailleurs, des schistes, qui étaient sans doute, avant l'arrivée du granite, peu cristallins, ont été transformés, par son contact, en *cornes*, ou en des sortes de gneiss : mais ces modifications sont limitées à une zone très restreinte, voisine du contact.

De même que celui des Grandes-Rousses, le terrain cristallophyllien du Pelvoux contient, çà et là, des *assises de conglomérats*. On y voit aussi des *schistes carburés*, analogues à ceux de Belledonne, dont je parlerai plus loin.

Les plis *alpins* ne coïncident point avec les plis *antétriasiques* Ils leur sont à peu près parallèles au Nord-Ouest du massif; mais, dans le Sud-Est, ils les coupent sous un angle de 90°. Tout le faisceau des plis *alpins* est déversé vers l'extérieur de la chaîne des Alpes. Ces plis, extraordinairement serrés et multipliés, ont des racines à peu près verticales; mais tous, à une certaine hauteur, se couchent brusquement vers l'Ouest, jusqu'à l'horizontale. Nul doute qu'ils ne se prolongeaient, autrefois, vers l'Ouest, par une série de nappes empilées. Les phénomènes d'étirement et de laminage atteignent, dans ces plis, une ampleur extraordinaire.

J'ai montré que les ondulations des axes des plis *alpins*, dans le Pelvoux comme dans les Grandes-Rousses, se coordonnent et forment une sorte de plissement accessoire, *orthogonal* au plissement principal; et j'ai donné [54] une carte d'ensemble indiquant à la fois les plis *antétriasiques*, les plis *alpins*, et les plis *orthogonaux*, pour toute la région du Pelvoux.

Je me suis, à différentes reprises [22, 24, 42, 53, 61, 65, 74, 75, 81, 82], occupé des roches éruptives de cette région. La plupart étaient inconnues avant mes études. Parmi ces roches nouvelles, je citerai des diabases, des minettes et des trachytes. D'autres, comme les basaltes (méla-

phyres) de la base du Lias, avaient été décrites avant moi : j'ai apporté ma contribution à la connaissance de ces laves. La roche à mica noir etsphène, que j'ai décrite sous le nom de *syénite du Lauvitel,* n'est qu'une *concentration magnésienne* dans le granite alcalin.

Chaîne de Belledonne [85]. — Le terrain fondamental de la chaîne de Belledonne est un terrain primaire, antérieur au Houiller, transformé en série cristallophyllienne : et ce terrain, dont nous ne savons pas l'âge, est le même que le terrain cristallophyllien du Pelvoux et des Grandes-Rousses. J'y ai signalé des *schistes carburés* contenant jusqu'à 2,5 pour 100 de carbone, analogues d'aspect aux schistes carburés graptolitifères des Pyrénées, mais très métamorphiques et ne montrant aucune trace d'organisme. J'ai aussi appelé l'attention sur la relation entre les amas de gabbros et de péridotites et les *gneiss basiques* (gneiss amphiboliques, parfois dioritoïdes).

La structure de la partie méridionale de la chaîne contraste vivement avec celle des massifs du Pelvoux et des Grandes-Rousses. Tandis que ces derniers sont plissés de façon intense et forment une série isoclinale déversée vers l'Ouest, la partie méridionale de Belledonne est une large voûte dont les flancs, souvent très raides, ne sont déversés ni dans un sens ni dans l'autre. Cette voûte a dû être recouverte autrefois par les nappes venues du Pelvoux et du Briançonnais.

Briançonnais [47, 53, 62, 66, 67, 70, 73, 74, 75, 81, 82, 84, 90, 98]. — J'ai consacré plusieurs années à l'étude minutieuse du Briançonnais, principalement de cette partie du Briançonnais qui s'étend entre la Durance et le bord Est du Pelvoux, et qui comprend les montagnes de Prorel, de Serre-Chevalier, de l'Eychauda, de Montbrison. Pour les questions stratigraphiques, j'ai été très souvent guidé par les études de mon savant ami, M. Kilian. Pour ce qui est de la tectonique, j'ai largement profité, et des observations faites dans les régions voisines par MM. Kilian, Haug et Lugeon, et de la contradiction qu'ont rencontrée, de la part de M. Kilian, mes premiers essais de synthèse générale.

En matière stratigraphique, j'ai décrit avec un soin particulier les roches intrusives du Houiller briançonnais, les conglomérats à galets cristallins de l'Eychauda, et les roches cristallines de l'Eychauda, Serre-Chevalier et Prorel.

Les roches intrusives du Houiller briançonnais [82] sont des microdiorites, des microsyénites ou des microgranites. Les premières affectent

exceptionnellement une forme granitoïde et deviennent alors des sortes de diorites micacées. Toutes ces roches offrent de telles analogies de composition et de structure que l'on ne peut douter qu'elles ne forment une série continue, comparable aux plus belles *suites* lithologiques étudiées jusqu'à ce jour, et dont la souche commune serait une *monzonite* (au sens de M. Brögger). Nous ne possédons aucune donnée sur l'âge de l'intrusion.

Les conglomérats à galets cristallins de l'Eychauda ont une forme littorale, ou plutôt *sublittorale*, du Flysch briançonnais. Leurs galets cristallins sont empruntés aux micaschistes et aux roches vertes des *schistes lustrés*. A l'Eychauda, ils sont compris dans une *écaille* d'origine lointaine. Mais M. Kilian a découvert des conglomérats identiques dans le Flysch *en place*, ce qui résout définitivement la question d'âge.

Les terrains cristallins de l'Eychauda, Serre-Chevalier et Prorel, sont formés de micaschistes, de gneiss (parfois porphyroïdes), d'amphibolites et, accessoirement, de roches vertes métasomatosées. Ils reposent sur le Flysch ou le Malm, tantôt directement, tantôt avec intercalation des conglomérats précédents. J'ai cru d'abord qu'ils étaient dus à une transformation, par dynamo-métamorphisme, des conglomérats tertiaires. J'ai reconnu ensuite qu'ils sont antérieurs aux conglomérats tertiaires; qu'ils appartiennent à la série des micaschistes et des roches vertes des *schistes lustrés;* que d'ailleurs, entre eux et le Flysch, ou entre eux et le Malm, il y a une *lame*, étirée et écrasée, de terrains briançonnais divers; qu'ainsi ils ont une origine exotique, et sont compris dans une écaille qui vient de l'Est, qui vient du pays des *schistes lustrés*. Et alors, comme il arrive toujours, la présence de ces terrains cristallins, qui rendait indéchiffrable la tectonique briançonnaise, a fourni, quand une fois l'énigme en a été éclaircie, la clef de tous les autres problèmes.

Une autre question stratigraphique qui m'a longtemps embarrassé est celle des *marbres en plaquette*. Ces marbres, très cristallins, parfois un peu phylliteux, ont une énorme épaisseur. Nous les avons d'abord, M. Kilian et moi, rangés dans le Trias; puis nous avons, chacun de notre côté, reconnu qu'ils passent parfois, latéralement, à du Malm fossilifère, et que leur partie haute est inséparable des calcaires nummulitiques. J'incline à croire, mais encore sans preuve décisive, que la partie moyenne est d'âge crétacé.

Quant à la tectonique, le pays compris entre la Durance et le Gyr, entre Briançon et Vallouise, est constitué par un empilement de *nappes*, d'*écailles* ou de *plis couchés*. Entre l'axe de l'*éventail alpin*, qui passe à quelques kilomètres à l'Ouest de Briançon, et la *zone du Flysch*, qui sépare le Briançonnais

du Pelvoux, j'ai compté *quatre écailles*, c'est-à-dire quatre séries sédimentaires successives, allant du Houiller, ou du Trias inférieur, au Flysch, posées les unes sur les autres, et formant un *paquet ondulé et plissé*. Dans ce paquet il y a, çà et là, des témoins de *séries renversées*, témoins discontinus, à l'intérieur desquels le laminage est toujours beaucoup plus intense que dans les *séries normales*. C'est ce que j'ai annoncé dès 1899 [70, 73].

L'écaille la plus haute (*quatrième écaille*) est le trait caractéristique de la région. C'est elle qui comprend les roches cristallines et les conglomérats à galets cristallins de l'Eychauda. Elle a elle-même une structure complexe, et c'est un *paquet replié*. Le fait capital, c'est que cette écaille complexe est posée sur le sommet de l'éventail, c'est-à-dire sur cette zone indécise, à l'Ouest de laquelle tous les plis se couchent vers l'Ouest, à l'Est de laquelle tous les plis se couchent vers l'Est; en sorte que l'on ne peut expliquer sa mise en place, quelle que soit son origine, sans admettre un *retroussement* des plis.

Cette *quatrième écaille* est venue de l'Est. Elle n'a pu venir d'ailleurs, parce que les terrains dont elle se compose n'affleurent qu'à l'Est de la Durance. Elle ne vient pas de bien loin, car la lame étirée que l'on observe à sa base contient beaucoup de grès houillers, et les affleurements de grès houillers non métamorphiques ne dépassent pas Briançon, du côté de l'Est. Elle a été posée sur le sommet de l'éventail *après la formation de cet éventail*. C'est une *nappe de recouvrement* due au *retroussement* et au brusque retour en arrière des têtes des premiers plis situés à l'orient de l'éventail, plis dont les racines affleurent aujourd'hui entre Briançon et la frontière italienne.

Après la mise en place de la *quatrième écaille*, il y a eu, dans le système empilé, des ondulations, des soubresauts et des plis, et, pour tout dire en un mot, une dernière déformation de l'éventail. Là où la *quatrième écaille* a été enlevée par l'érosion, par exemple dans le massif de Pierre-Eyrautz, on constate que toute la région voisine de l'axe de l'éventail est extraordinairement *écrasée* et tourmentée : toutes les assises, même les plus jeunes, y ont été surchargées, pressées, et finalement étirées par une série de mouvements peu réguliers, souvent capricieux, quelquefois discordants. *La zone du Briançonnais est un éventail de plis, ultérieurement deformé et ecrasé.* Les déformations et l'écrasement sont tels qu'ils ne peuvent s'expliquer que par une surcharge momentanée, pesant sur toute la zone de l'éventail, et se déplaçant, longuement et péniblement, à la façon d'un *traîneau écraseur*, dans une lente translation de l'Est vers l'Ouest.

L'histoire du Briançonnais peut donc se résumer ainsi. Pendant de

longs siècles, cette région a correspondu au bord, fréquemment déplacé et troublé, du géosynclinal; puis elle a été façonnée en un anticlinal, et cet anticlinal, d'abord vertical, a pris peu à peu, par décompression de la zone superficielle, une disposition en éventail. Enfin, l'éventail a été écrasé, déformé, et, dans sa partie haute, refoulé vers l'Ouest par la translation d'une masse écrasante. La *quatrième écaille* est un témoin des terrains charriés que cette masse écrasante entraînait avec elle [90, 98]. Toute cette histoire me semble, aujourd'hui, parfaitement claire et absolument certaine. On pourra varier quant aux hypothèses à faire sur la nature et l'origine de la masse écrasante. Mais je ne crois pas que l'on puisse désormais douter du passage de cette masse sur le Briançonnais.

III. — Études géologiques et pétrographiques diverses.

Roche vitreuse (tachylyte) du fond de l'Atlantique Nord. — J'ai signalé en 1899 [71, 72] l'existence, au fond de l'Atlantique Nord, par 3000^{m} environ de profondeur, d'affleurements de basalte vitreux (*tachylyte*). La région où les dragages ont permis de récolter des esquilles de cette roche se trouve à 500 milles environ au Nord des Açores, sur la ligne qui joint cet archipel à l'Islande. Le fait que le fond de l'Atlantique, entre ces deux régions volcaniques, est constitué par des roches éruptives, ce fait, dis-je, est déjà intéressant. Mais il est bien curieux que les roches en question soient des verres, alors que la profondeur est de 3000^{m}.

Granites d'Algérie. — J'ai repris l'étude de quelques granites du Nord du département de Constantine, et je suis arrivé à des résultats assez intéressants [87, 91, 92, 95].

Quant à la composition chimique, les granites de cette région semblent former une série continue, allant d'un pôle *alcalin*, qui est le granite du Filfila, à un pôle calcique, qui est le granite de Ménerville (*adamellite* de MM. Duparc et Pearce).

Le granite du Filfila forme des amas dans un terrain sédimentaire qui, très probablement, est de l'Eocène supérieur. Tout autour des amas, les sédiments sont métamorphosés d'une manière plus ou moins intense. Le granite lui-même, au contact des calcaires, prend un peu de calcium, tandis que les calcaires sont transformés en pyroxène.

Le granite des Beni-Toufout, entre El-Milia et Collo, exerce sur l'Eocène

encaissant un métamorphisme analogue (formation de grenatites et pyroxénites), mais beaucoup plus intense, et qui va jusqu'à la production de micaschistes. Et comme la séparation me semble impossible, de ces assises éocènes métamorphiques et des assises cristallines rapportées, dans la même région, à l'Archéen par divers géologues, on peut se demander s'il y a vraiment de l'Archéen dans le massif des Beni-Toufout, et si tout n'est pas de l'Eocène. Peut-être la même question se posera-t-elle pour les gneiss de Bône. Il y aurait alors, en Algérie, une série cristallophyllienne tertiaire, qui correspondrait aux Schistes lustrés des Alpes occidentales.

Prolongement du bassin houiller de la Haute-Silésie sous le bord Nord des Carpathes. — M. Eduard Suess, après Hohenegger, a prédit le prolongement, sous les grès des Carpathes, du bassin houiller de la Haute-Silésie. J'ai précisé cette indication générale et indiqué les points, ou plutôt les zones, où il est le plus rationnel d'exécuter des recherches. Les résultats d'un sondage entrepris, sur mon conseil, à Paskau, à 10^{km} environ au Sud de Mährisch-Ostrau, ont confirmé mes prévisions. Ce sondage a traversé, sous les terrains carpathiques (crétacés), des argiles, des sables et conglomérats miocènes ; et, sous le Miocène, à 400^{m} du jour, il a pénétré dans le terrain houiller. Il est désormais avéré que les Carpathes sont en recouvrement sur le Miocène, et l'on peut penser que le terrain houiller se prolonge encore beaucoup plus loin vers le Sud.

IV. — Résultats d'ordre général.

Contribution a la connaissance de la metasomatose des roches éruptives. — Pour spéculer sur la composition chimique d'une roche éruptive, il faut pouvoir, au moins approximativement, reconstituer son état originel. Cette reconstitution est naturellement d'autant plus difficile et plus incertaine que la métasomatose est plus avancée. Mais j'ai montré [61, 65] que, dans certains cas, lorsque les minéraux détruits ont gardé leurs formes géométriques, et lorsque, dans l'échantillon lui-même ou dans des échantillons évidemment congénères, il subsiste, au milieu des ruines, quelques témoins intacts des minéraux primitifs, la reconstitution devient facile.

Ces cas sont plus fréquents que l'on n'aurait pu croire. J'ai *restauré* ainsi presque toutes les roches éruptives de la région des Alpes françaises que j'ai étudiée, et j'enseigne chaque année, dans mon cours de l'École des

Mines, comment on doit pratiquer de semblables restaurations. Je crois être le premier à avoir indiqué cette méthode générale, et à avoir mis les pétrographes en garde contre les dangers que présente l'étude chimique des roches quand on ne considère que des analyses brutes.

L'application de la méthode à un très grand nombre de roches m'a conduit à cette constatation : que, dans beaucoup de cas, la métasomatose des roches éruptives consiste principalement dans le départ de la chaux. C'est ce que j'ai appelé la métasomatose *décalcifiante,* ou la *décalcification.* Quand l'eau de pluie tombe sur un affleurement de roche éruptive riche en calcium, l'élément que cette eau emporte avant tous les autres, et en quantité plus grande que tous les autres, c'est le calcium. L'eau qui sort de la roche en question, n'ayant d'ailleurs, depuis sa chute, traversé aucune autre roche, contient plus de chaux que de soude, ou de potasse, ou d'alumine, ou de magnésie, ou de silice.

Les seules eaux qui ne sont pas décalcifiantes sont celles qui sont saturées — par leur passage préalable à travers des roches calciques — de silicate et d'aluminate de chaux. De telles eaux, agissant sur de nouvelles roches, leur enlèvent la soude, la potasse, le fer, et, dans une faible mesure, la magnésie; et elles peuvent développer sur place de nouvelles combinaisons calciques, comme l'épidote, la zoïsite, la wernérite.

Les eaux qui ont déjà traversé des roches, mais qui ne sont pas encore saturées de silicate et d'aluminate de chaux, agissent comme cause décalcifiante, et d'autant plus énergiquement qu'elles apportent avec elles une plus grande quantité de silicates alcalins. L'eau qui sort du granite est plus décalcifiante pour une roche éruptive basique que l'eau de pluie pure.

Un massif granitique ou gneissique, dont les affleurements sont, d'une façon générale, très pauvres en calcium, est une *source d'alcalis.* Tel est le massif du Pelvoux. Les eaux qui ont traversé ce massif sont silicatées alcalines; elles sont, presque partout, éminemment décalcifiantes. Dès qu'elles rencontrent les silicates et les silico-aluminates calciques, elles les corrodent, pour leur prendre de la chaux et de l'alumine, et abandonner des alcalis en échange. Dans tout ce massif, et dans toute la région environnante, on doit s'attendre à trouver des cristaux *secondaires* d'albite et d'orthose. Ces minéraux sont, actuellement, dans une semblable région, les plus stables.

Contribution a l'étude de la différenciation des magmas éruptifs. — On sait que, dans nombre de régions volcaniques ou de régions de roches intru-

sives, il y a une parenté très évidente entre les diverses roches. L'explication de cette parenté est fort difficile, surtout lorsque, dans la série en question, la composition chimique des roches varie beaucoup; et l'on n'a pas encore trouvé de théorie bien satisfaisante : mais le fait lui-même n'est pas contestable.

La *suite* des roches intrusives du Houiller briançonnais [82] est, à cet égard, une des plus remarquables qu'il y ait. Ces roches vont d'un microgranite à 71 pour 100 de silice à une microdiorite à 52 pour 100 de silice. La chaux varie de 2 à 8,5 pour 100; la somme des alcalis, de 9 à 5,5 pour 100. Chose curieuse : la richesse en soude est sensiblement constante (4,5 pour 100). Il y a, entre les pôles extrêmes, tous les passages.

Si l'on classe ces roches par ordre de teneur croissante en silice, on les classe du même coup par ordre de teneurs décroissantes en oxydes de fer, en magnésie et en chaux, et par ordre de richesse croissante en potasse. L'ensemble du tableau ainsi réalisé donne au plus haut degré l'impression de la continuité. Il n'est donc guère douteux que toutes ces roches ne dérivent, par une différenciation d'ailleurs inexpliquée, d'une souche commune, d'un magma commun.

J'ai essayé de me rendre compte de la composition qu'aurait ce magma commun, en admettant qu'il contienne des quantités des divers magmas différenciés proportionnelles à l'importance des affleurements de chaque type. Cette proportionnalité n'est nullement certaine, mais elle est, tout au moins, vraisemblable. On obtient de la sorte une composition qui est celle d'un magma *monzonitique;* et la monzonite, dont j'entrevois ainsi l'existence sous nos Alpes briançonnaises, ne serait guère différente de la monzonite tyrolienne. Rien ne s'oppose d'ailleurs, jusqu'ici, à ce que l'on attribue le même âge à l'intrusion des roches briançonnaises et à la montée de la monzonite du Tyrol.

Le problème du Cristallophyllien. — Ce problème, qui est celui de l'origine des gneiss et des micaschistes, est l'un des plus intéressants de la Géologie. J'ai apporté à son étude de nombreuses contributions [8, 18, 20, 26, 32, 37, 63, 69, 84, 86, 90, 91, 97, 98].

La question du Cristallophyllien a fait un grand pas le jour où il a été *démontré* qu'il y a des gneiss et des micaschistes de divers âges, et qu'il n'est pas impossible d'arriver à connaître l'âge précis d'une série cristallophyllienne. La *démonstration*, entrevue jadis par Lachat, a été donnée par moi en 1891 pour les schistes cristallins de la Vanoise, et par MM. Marcel

Bertrand et Franchi, quelques années plus tard, pour les Schistes lustrés des Alpes occidentales.

Nous savons aujourd'hui qu'il y a, dans les Alpes occidentales, trois *séries cristallophylliennes*, trois complexes métamorphiques, d'âges fort différents. Dans chacune il y a des micaschistes, des gneiss et des amphibolites ; et le métamorphisme n'est pas beaucoup moins intense dans l'une des séries que dans les autres. La première série, la plus ancienne des trois, est antérieure au Houiller; et l'on ne sait rien de plus sur son âge. La deuxième est formée par le Houiller et le Permien, devenus, graduellement, métamorphiques. La troisième comprend les *schistes lustrés* et les *roches vertes* qui leur font cortège. Cette dernière série est postérieure au Trias moyen. Comme elle est très épaisse, sa partie haute peut être beaucoup plus jeune. J'incline à croire, pour ma part, que cette partie haute est éocène; et je vois dans les Schistes lustrés une *série compréhensive*, mésozoïque et néozoïque, je veux dire une série sédimentaire continue, allant du Trias supérieur à l'Éocène.

En France et sur la frontière franco-italienne, la série permo-houillère et la série mésozoïque (Schistes lustrés) sont séparées par le Trias inférieur et moyen, non métamorphique (Ubaye, Briançonnais), ou incomplètement métamorphique (Vanoise, Tarentaise). Mais quand on descend sur le versant italien, on voit bientôt le Trias devenir totalement cristallin et méconnaissable. La limite entre les gneiss permo-houillers et les Schistes lustrés est alors indécise; et les deux séries cristallophylliennes n'en font plus qu'une. Il en est de même dans les Alpes Pennines.

J'ai résumé [97], devant le Congrès géologique international de Vienne, les enseignements que l'on peut tirer, à l'heure actuelle, de l'étude des terrains cristallins des Alpes occidentales. Je les rappelle ici brièvement.

Tout d'abord, comme M. Michel Lévy l'a annoncé il y a 16 ans, l'origine sédimentaire des assises qui sont, plus tard, devenues des micaschistes ou des gneiss, n'est pas douteuse.

En second lieu, le *métamorphisme régional* — je veux dire la cristallisation générale, sur un immense espace, de toute une série sédimentaire — ne peut pas s'expliquer par les actions dynamiques, par le *dynamométamorphisme*. J'ai cru autrefois, comme tout le monde, que les actions dynamiques peuvent transformer les roches : ces actions *déforment*, mais ne *transforment* point. Nous avons la preuve irréfutable que, dans le Briançonnais, les micaschistes des Schistes lustrés avaient atteint tout leur métamorphisme avant les mouvements orogéniques, avant le morcellement du géosynclinal alpin. Il

convient de reserver le nom de *métamorphisme* aux causes capables de transformer complètement une roche, de la muer en une autre roche, tout aussi définie que la première et vraiment différente, et d'opérer cette transformation sur un vaste espace. *Le dynamométamorphisme n'existe pas;* et ce nom doit disparaître de la Science.

En troisième lieu, le métamorphisme régional est lié, malgré tout, aux phénomènes qui ont préparé les chaînes de montagnes : il n'atteint que les matériaux qui sont dans une condition géosynclinale. C'est ce qu'a dit, il y a déjà 10 ans, M. Marcel Bertrand. Chaque chaîne a sa série cristallophyllienne. La *série cristallophyllienne alpine,* c'est l'ensemble de la série permo-houillère, du Trias, et des Schistes lustrés : ensemble où la cristallinité n'est discontinue qu'en France, sur le bord du géosynclinal alpin, mais où la cristallinité devient peu à peu continue lorsqu'on s'approche de la région centrale de ce même géosynclinal. Quant à la série anté-houillère, elle est indépendante de la chaîne alpine : c'est un témoin d'une ancienne chaîne. Les chaînes successives empiètent les unes sur les autres. Un jour viendra, peut-être, où la moitié orientale des Alpes franco-italiennes — cette moitié qui nous manque, parce qu'elle est effondrée — reparaîtra dans les plis *extérieurs* d'une nouvelle chaîne. Les gneiss et micaschistes alpins, qui seront alors ramenés près de la surface, joueront, vis-à-vis de cette nouvelle chaîne, le même rôle que jouent, dans les Alpes, les terrains cristallins de Belledonne, du Pelvoux et du Mont-Blanc.

En quatrième lieu, le métamorphisme régional, quelle qu'en soit la cause, a agi de la même façon dans toutes les chaînes et à tous les âges. Il n'y a pas de différences lithologiques *essentielles* entre les micaschistes et les gneiss des diverses séries.

En cinquième lieu, le métamorphisme régional n'a point pour cause l'intrusion et la *mise en place* des roches massives. Cette intrusion, ou cette mise en place, sont des *épisodes* du métamorphisme régional. La cristallinité générale des assises et la formation des amas de roches massives sont liées entre elles, non pas comme un effet à sa cause, mais comme deux effets de la même cause. On comprend ainsi, ce qui, sans cela, serait inexplicable, que ces amas, dans les Alpes, tantôt semblent avoir agi, et tantôt semblent être restés sans action, sur les couches encaissantes. Ils sont restés inertes toutes les fois que les terrains encaissants étaient déjà saturés des fluides que ces amas pouvaient émettre; ils ont ajouté quelque chose au métamorphisme ambiant, toutes les fois que les terrains encaissants n'avaient pas atteint la saturation.

En sixième lieu, enfin, la cause du métamorphisme régional, quelle qu'elle soit, s'est étendue, dans le sens horizontal, à des distances de l'axe du géosynclinal qui sont très variables suivant les étages. Dans les divers terrains, tous concordants et encore sensiblement horizontaux, qui étaient soumis à son action, le métamorphisme régional a fait *tache d'huile;* mais la tache d'huile s'est étalée très différemment aux divers niveaux. C'est ainsi que, dans les Alpes, des assises houillères sont restées intactes, tandis que les assises permiennes, au-dessus d'elles, devenaient des micaschistes. De même, des calcaires du Trias demeuraient inaltérés, tandis que les couches qui leur servaient de mur, et celles qui leur servaient de toit, se transformaient d'une façon complète.

Il est évident, puisque la condition géosynclinale semble nécessaire, que l'enfouissement des assises à une grande profondeur est l'un des éléments du métamorphisme régional. Je crois qu'il faut autre chose, qu'il faut un apport : puisque aucun terrain sédimentaire ne contient, ni autant d'alcalis, ni autant de magnésie, qu'un terrain cristallophyllien. J'ai tenté [86, 90] d'expliquer cet apport par des *colonnes filtrantes*, venues d'en bas, et montant, comme d'une chaudière, du fond de la région centrale du géosynclinal.

Synthèse des Alpes franco-italiennes. — C'est dans le Briançonnais, et spécialement dans les montagnes comprises entre Vallouise et Briançon, que se trouve la clef de la structure des Alpes franco-italiennes. C'est là, en effet, que l'on voit, posés *par-dessus l'éventail alpin*, des témoins d'une nappe charriée, venue de la région orientale; et c'est là aussi que la déformation de l'éventail est à son comble, et que l'on peut le mieux se rendre compte de l'écrasement prodigieux que cet éventail a subi.

J'ai essayé dernièrement [90], après avoir dessiné quelques coupes qui traversent normalement toute la chaîne, de rendre compte, par une hypothèse tectonique, de tous les faits observés.

S'il est bien vrai, comme M. Marcel Bertrand l'a établi dès 1894, que les Alpes franco-italiennes sont construites en éventail, il est non moins certain que cet éventail est tout à fait dissymétrique. Les plis occidentaux, incroyablement serrés et multipliés, sont couchés jusqu'à l'horizontale, et parfois jusqu'au delà de l'horizontale ; et ils sont tellement laminés qu'ils vont, dans le paquet où ils s'empilent, s'amincissant et se renflant tour à tour, ou même s'égrenant dans des plans de glissement, véritables surfaces de charriage. Au contraire, les plis orientaux, beaucoup moins nombreux,

ont une allure relativement tranquille, et n'atteignent jamais, dans leur déversement, l'horizontale.

Pour moi, la formation de l'éventail n'est, dans l'histoire de cette partie des Alpes, qu'un phénomène accessoire, résultant de ce que, à un certain moment, et après une striction intense, il est survenu une décompression dans la région superficielle. L'anticlinal central, façonné par la striction, s'est alors, dans sa partie haute, déversé sur les deux synclinaux voisins, c'est-à-dire qu'il a pris la forme en éventail.

Le phénomène principal, celui qui se préparait depuis longtemps, et dont la striction et la décompression préalables auxquelles est dû l'éventail n'étaient que des symptômes avant-coureurs, le phénomène principal, dis-je, c'est le passage, par-dessus l'éventail, par-dessus toute la zone du Briançonnais, d'une masse écrasante, d'un *traîneau écraseur*, animé d'un mouvement de translation de l'Est vers l'Ouest.

Sous cette masse écrasante, les plis orientaux ont été, dans leur partie haute, retroussés, et les plis occidentaux ont été couchés, écrasés et laminés. Ceux-ci ont donné des nappes à long cheminement qui ont couvert le Pelvoux et la chaîne de Belledonne. Ceux-là ont fourni d'autres nappes, plus élevées que les premières, et dont la *quatrième écaille* briançonnaise est un témoin : c'est l'équivalent des *nappes des racines internes* de M. Lugeon. La plus haute de ces nappes devait être formée de gneiss permo-houillers : il n'en reste plus aucun témoin en France, mais son prolongement au Nord-Est constitue une grande partie des Alpes Pennines. Quant à la masse écrasante elle-même, dont il ne reste rien, ni en Suisse, ni en France, elle devait provenir de la région orientale du géosynclinal alpin.

Il est aisé de marquer la limite que ces charriages n'ont pas dépassée, du côté de l'Ouest : c'est le bord extérieur de la chaîne de Belledonne, ou, ce qui revient au même, le bord intérieur des chaînes subalpines. A partir de là, en effet, les terrains ont été plissés, *mais non plus écrasés*; leurs plis sont fréquemment *hésitants*, c'est-à-dire déversés, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. La surcharge a manqué, et aussi la translation de la zone superficielle.

La chaîne résulte, en somme, du resserrement progressif d'un vaste géosynclinal. Ce resserrement a débuté par le morcellement de la fosse de sédimentation. Il a continué par le façonnement, dans les terrains du géosynclinal, de plis plus ou moins serrés, qu'une décompression momentanée a ensuite disposés en éventail. Il s'est achevé par la mise en marche, de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne, de toute une portion *superficielle*

de l'écorce, roulant, sous elle, des plis couchés superposés, dont les débris, fragmentés par l'érosion, sont nos nappes de recouvrement.

La généralité du phénomène de recouvrement, prédite, dès 1884, pour les Alpes suisses, par M. Marcel Bertrand, n'est plus contestable aujourd'hui. De même que les Alpes suisses, dont les plis *autochtones* sont encore recouverts par un paquet de nappes (M. Lugeon), les Alpes françaises ont été enfouies sous d'immenses masses de terrains charriés. Mais il ne reste plus, chez nous, de ces masses charriées, que des témoins isolés et dont l'épaisseur est fort réduite : ce sont les nappes du Briançonnais, celles de la Savoie, celles encore que MM. Kilian et Haug ont découvertes dans l'Ubaye et l'Embrunais. La plupart des massifs alpins de France sont exclusivement formés de plis *autochtones*.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Minéralogie.

Géologie et Pétrographie.

34174 Paris. — Imprimerie Gauthier-Villars, quai des Grands-Augustins, 55.